

# Quarks, Leptons et Interactions fondamentales

Il y a quarante ans, l'humanité inscrivaient une nouvelle œuvre à son patrimoine scientifique universel. En accomplissant une étape de plus vers une modélisation unifiée de toutes les forces fondamentales, Glashow, Salam et Weinberg emboîtaient le pas à Newton, Maxwell, Einstein et beaucoup d'autres qui s'étaient inscrits dans leur élan. Indépendamment, cette avancée vers une théorie s'appliquant partout corrobore l'observation que notre Univers est né d'un événement unique, compact et causal dans un espace homogène. Tout vient de là, de cet événement unique d'entropie minimale – de cette force originelle et unifiée – que nous pouvons alors tenter de reproduire par l'étude du commencement (ou presque) jusqu'à nos jours.

Dès lors la recherche en physique des particules n'a eu de cesse que de vérifier les prédictions de cette nouvelle théorie. Un guide, un programme nous avaient été fournis. Bien sûr, il y eut encore des surprises: la découverte d'autres familles de leptons et de quarks, lesquelles prirent leur place dans le modèle en le consolidant d'une certaine manière; mais pour l'essentiel, les plus grands programmes expérimentaux ( $Spp\bar{S}$ , TeVatron, LEP, HERA, LHC...) mirent le cap sur les nouveaux phénomènes: les courants neutres, les bosons W & Z et le boson de Higgs, Englert et Brout, plus communément appelé le boson de Higgs.

Aujourd'hui, ces phénomènes sont pratiquement tous devenus standard. Seul le

boson de Higgs manque à l'appel. Cependant, son existence est admise comme la plus probable des hypothèses par la plupart des physiciens, car la cohérence de la théorie et la génération dynamique de la masse des particules élémentaires reposent en très grande partie sur la présence des champs de Higgs. Toutes les données recueillies jusqu'à présent portent à croire que le boson de Higgs standard devrait avoir une masse inférieure à 190 GeV à 95% de niveau de confiance. Sa recherche reste l'objectif principal du programme LHC, de l'expérience ATLAS et dans une moindre mesure de l'expérience DØ installée auprès du TeVatron; deux projets auxquels le LPSC participe. De surcroît, ces deux instruments permettront d'améliorer la précision des mesures des masses du boson W et du quark top – ainsi que de leurs sections efficaces de production – ce qui poussera encore plus loin le test de la cohérence globale de la théorie.

Tout est-il parfait pour autant? Certes non! D'abord les masses des neutrinos (très petites devant celle d'un électron) et leur matrice de mélange – dont l'existence nous est révélée depuis 1998 – ne trouvent que marginalement leur place dans le modèle; ce qui incite certains physiciens enthousiastes à suspecter qu'elles pourraient déjà constituer des balises nous indiquant le chemin vers la prochaine étape d'unification. Par ailleurs, notre Univers – qui semble n'être composé que de matière – aurait besoin d'un niveau de

violation de la symétrie d'inversion combinée de la charge et de l'espace (CP) bien supérieure à ce qui est actuellement mesuré dans les décroissances des mésons K et B standard. Un tel effet pourrait donner lieu à l'observation d'un moment électrique dipolaire du neutron mesurable dans une expérience (nEDM) à laquelle nous participons et qui se déroulera au PSI à Villigen (Suisse).

Poussée dans ses retranchements aux énergies extrêmes, cette théorie, qui constitue avec la chromodynamique quantique le modèle standard, semble souffrir d'instabilité, de divergences de calcul qu'il est bien difficile de juguler par un unique ajustement de ses paramètres libres. N'aurions-nous pas alors besoin d'une symétrie plus vaste afin d'éliminer ou d'adoucir la contribution de certains processus aux plus hautes énergies? Nous pensons être en mesure de répondre partiellement à cette question, car toute nouvelle symétrie apportera presque inmanquablement de nouveaux bosons neutres qui pourraient être observés par ATLAS et CMS, les deux grandes expériences du LHC.

Lors des dix dernières années, l'étude de l'expansion de l'espace-temps et la mesure précise de l'anisotropie du rayonnement fossile électromagnétique ont révélé que les constituants élémentaires que nous connaissons ne contribuent au plus qu'à 5% de l'énergie volumique moyenne de l'Univers. N'aurions-nous pas besoin de plus de

particules élémentaires? De partenaires supersymétriques aux constituants élémentaires actuels, dont l'un d'entre-eux au moins pourrait être stable et n'interagirait que faiblement avec la matière ordinaire? S'il en est ainsi, nous pourrions observer sur ATLAS un boson de Higgs chargé, qui du fait de sa masse, se couplerait aisément avec un quark top.

Une autre question plus difficile encore se pose: quel est le chemin vers la gravité quantique dont toutes les tentatives de modélisation actuelles semblent requérir l'extension du nombre de nos dimensions spatiales? En mesurant avec précision les niveaux quantiques d'un neutron piégé dans un puits de pesanteur terrestre, des dimensions de cette nature qui se manifesteraient à très petite échelle par une modification du potentiel gravitationnel newtonien pourraient être observées. C'est l'objectif du projet GRANIT à l'ILL (Grenoble) auquel nous participons.

En dépit de son extraordinaire potentiel de découverte, le LHC pourrait ne pas avoir toute la précision requise pour étudier en détails tous les modes de désintégration du boson de Higgs – même s'il le découvre – ni certains scénarios de nouvelle physique. Le projet ILC (International Linear Collider) – auquel nous participons – visera à pallier ces lacunes par des mesures de précision effectuées dans des collisions électron-positron entre 90 et 1000 GeV et à très haute luminosité.

## L'expérience ATLAS

*Fairouz Malek, Bertrand Brelier (th), Florent Chevallier (th), Benoit Clément, Johann Collot, Sabine Crépe-Renaudin, Jean-Yves Hostachy, Julien Labbé (th), Fabienne Ledroit-Guillon, Annick Lleres, Arnaud Lucotte, Julien Morel (th), Jan Stark, Benjamin Trocmé*

*ATLAS is one of the four LHC experiments, built to accomplish precise measurements of the Standard Model parameters and to discover the Higgs boson. It is also devoted to observe new particles as predicted by the models that go beyond the established theory: e.g. the SUSY particles. This experiment has finished the assembly of its sub-detectors and is ready for commissioning. The LPSC participated to the construction, the assembly and the tests of the presampler - one element of the liquid argon electromagnetic calorimeter - and to the design, the construction and the installation of its proximity cryogenics. Among the other activities of the group, one may also point out the design and the development of the core offline software system and its validation, the development and the maintenance of two middlewares, the tag collector and the meta-data bookkeeping (AMI), the involvement in the electromagnetic calorimeter commissioning, and the physics studies, such as the production of the heavy Z' boson, the measurement of the single top cross section and the discovery potential of the Higgs and its decay to two photons.*

ATLAS est l'une des deux expériences généralistes du LHC, le futur grand collisionneur hadronique p-p. L'énergie dans le centre de masse des 2 protons en collision sera de 14 TeV ouvrant ainsi un domaine d'énergie encore inexploré. ATLAS et CMS (la seconde expérience généraliste) espèrent découvrir le boson de Higgs. Hormis la recherche du Higgs, ATLAS va sonder le Modèle Standard, faire des mesures de précision dans le secteur du B, du Top et de la QCD et explorer les hypothèses faites dans d'autres théories allant au delà du Modèle Standard: supersymétrie, dimensions supplémentaires...

Au LPSC, durant les années 2006 et 2007, nous avons participé à la construction, l'intégration et la mise en route de la cryogénie de proximité du calorimètre électromagnétique, au développement de l'infrastructure logicielle de l'expérience avec AMI (meta-data Bookkeeping) et le Tag Collector (gestion des versions du logiciel), à l'écriture du logiciel de base du calorimètre, à la mise en service du calcul et du calorimètre électromagnétique ainsi qu'à plusieurs études de canaux de physique: le Z' en 2 leptons, le top célibataire, la physique du Higgs en 2 photons.

### Mise en route du calorimètre à argon liquide

Depuis avril 2007, tous les calorimètres à argon liquide sont à température nominale et connectés à la chaîne d'acquisition finale. Cet événement constitue une étape majeure dans les opérations de mise en route du calorimètre qui se déroulent depuis début 2005. Ces opérations consistent notamment en la prise régulière de données de calibration et de données cosmiques, différentes opérations auxquelles le groupe du LPSC a diversement contribué.

Une contribution importante du groupe a notamment été la prise en charge de la coordination de l'opération du tonneau depuis avril 2007. Cela implique l'organisation pratique de la prise de données, la formation des personnes en charge de l'opération, la rédaction d'un manuel d'opération...

Durant la prise de données proprement dite – d'étalement ou de cosmiques –, il est crucial de pouvoir contrôler en ligne la qualité de l'acquisition. À cet effet, deux algorithmes ont été développés au laboratoire: le premier consiste en une vérification globale de l'intégrité des données afin de s'assurer du bon fonctionnement des cartes d'acquisition et de l'absence de données corrompues par la chaîne de lecture. Le second algorithme consiste en une détection des cellules chaudes ou mortes du calorimètre.

La prise de données cosmiques nécessite un déclenchement externe. Celui-ci est assuré par le calorimètre à tuiles grâce à des cartes de coïncidence spécifiques qui ont été conçues par le groupe de l'université de Chicago, mais dont la production et les tests ont été partiellement pris en charge par le service électronique du LPSC. Délivrées au CERN à l'automne 2006, ces cartes donnent entière satisfaction depuis.

Enfin, une fois les données acquises, il convient de les analyser: le groupe du LPSC a pris la responsabilité de trois analyses pour le tonneau du calorimètre:

- Étude du bruit électronique: si les mesures démontrent des performances globales très prometteuses, une certaine sensibilité du détecteur à des bruits de hautes fréquences a été révélée. Cela a conduit à l'installation de filtres spécifiques au plus près du calorimètre, qui ont permis de résoudre ce problème.
- Mesure de la diaphonie: cette mesure a principalement confirmé celles qui avaient été effectuées au cours des nombreux faisceaux tests des années précédentes. Elle a également permis de révéler des inversions dans le câblage, qui sinon n'auraient jamais pu être mises en évidence avant le démarrage du LHC.
- Mesure de la stabilité de la distribution de l'horloge: cette étude a permis de confirmer que les spécifications mentionnées dans le TDR (stabilité meilleure que 160 ps) ont été largement remplies.

L'ensemble de ces analyses, ainsi que toutes les activités mentionnées auparavant, nous permet de renforcer notre compréhension du calorimètre à argon liquide tel

qu'il est installé dans la caverne d'ATLAS. Cela sera un élément déterminant pour produire rapidement des données de qualité.

## Participation du service Informatique au Software et Computing d'ATLAS

S. Albrand, J. Fulachier et F. Lambert, ingénieurs du service informatique, sont responsables de deux applications centrales de l'infrastructure logicielle de l'expérience.

L'application AMI (Atlas Metadata Interface) [1,2] a été choisie en juillet 2006 pour assurer la sélection des données (« dataset selection catalogue »). Actuellement les catalogues d'AMI contiennent toute la production Monte-Carlo officielle d'ATLAS. De fait, les données ne sont considérées officielles que lorsqu'elles ont été enregistrées dans AMI. Cette application est destinée à voir le nombre de ses utilisateurs augmenter considérablement dès le démarrage de l'accélérateur. Ce travail a donné lieu à une collaboration avec l'Université de Glasgow et depuis 2006 avec l'IMAG (INPG).

L'autre application dont nous sommes à l'origine s'appelle « Tag Collector » [3]. Cette application est devenue essentielle à la gestion des versions (« releases ») du « software » d'ATLAS car elle catalogue les versions de différents « packages » de software et impose les règles établies par le coordinateur. Par exemple on peut contrôler quels packages peuvent être ajoutés, et qui a l'autorisation pour le faire. Cette application est utilisée par tous les développeurs de logiciel d'ATLAS.

AMI et le Tag Collector sont écrits en JAVA. Elles utilisent le même logiciel de base ainsi que des bases de données de type MySQL (à Grenoble) et ORACLE (au CCIN2P3).

## Recherche de nouveaux bosons de jauge neutres

De nombreux modèles au-delà du Modèle Standard (MS) prédisent l'existence de nouveaux bosons de jauge, ou de nouveaux états de bosons de jauge connus. Nous nous intéressons au cas des bosons neutres, dans le cadre de deux grandes familles de modèles : ceux dans lesquels le groupe de jauge  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  du MS est étendu, et ceux qui proposent d'incorporer un nombre de dimensions d'espace-temps supérieur à quatre, que l'on appelle modèles avec des dimensions supplémentaires. On désigne par le même nom :  $Z'$ , l'état propre de masse du nouveau boson neutre le plus léger dans les premiers modèles, et le premier état des excitations dites de Kaluza-Klein (KK) des bosons neutres du MS dans les seconds.

Aucun  $Z'$  n'ayant encore été observé jusqu'ici, ni directement ni indirectement, sa masse, s'il existe, doit être supérieure à environ 700 GeV dans le cas des modèles avec groupe de jauge étendu, et environ 4 TeV dans le cas des dimensions supplémentaires. Avec ses

14 TeV d'énergie disponible dans le centre de masse, le LHC ouvrira largement la fenêtre de découverte de ces bosons.

Le groupe de Grenoble est impliqué dans la préparation de cette analyse depuis fin 2003. Nous avons choisi le canal  $Z' \rightarrow e^+e^-$  qui sera le mieux mesuré avec ATLAS. Nos premières études ont concerné la discrimination entre les divers modèles de  $Z'$ . Elles ont donné lieu à un exposé au workshop TeV4LHC [4], un exposé à la conférence HEP2005 [5] et à la publication d'une note ATLAS [6]. Étant donné la proximité du démarrage de l'expérience, nous avons ensuite recentré nos analyses sur l'évaluation du potentiel de découverte des bosons  $Z'$  et l'étude des méthodes statistiques nécessaires à l'évaluation de limites en cas de non découverte. Les résultats obtenus, axés sur la possibilité d'obtenir des potentiels et des limites indépendants du modèle, constitueront la majeure partie de la thèse qui a fait suite au stage de Master évoqué dans le précédent rapport d'activité. Ils feront également partie d'une publication ATLAS dans le cadre de l'exercice CSC (Computing System Commissioning).

Parallèlement, dans le cadre d'une collaboration initiée au sein du GDR-SUSY, nous avons étudié un nouveau modèle de dimensions supplémentaires, de type Randall-Sundrum, qui tente d'expliquer la hiérarchie des masses des fermions en les autorisant à se propager dans le « bulk », leur fonction d'onde ayant un recouvrement plus ou moins important avec la « brane » du Higgs. Ceci nous a conduit à publier le potentiel d'ATLAS pour la découverte d'un  $Z'$  dans ce modèle [7].

## Mesure des sections efficaces de production de quarks top célibataires

Depuis la découverte du quark top à Fermilab en 1995 par les collaborations DØ et CDF, une campagne de mesures s'est ouverte afin d'en déterminer les propriétés. Sa masse, sa largeur, son spin, sa charge électrique, ou encore ses couplages aux autres composants du modèle standard font l'objet de nombreuses recherches auprès du TeVatron. En raison de sa masse élevée, la production d'événements comprenant un ou plusieurs quarks top reste de faible probabilité auprès du TeVatron, limitant ainsi la précision de la plupart de ces mesures. Avec plus de 8 millions de paires de quarks top et plus de 2 millions de quarks top célibataires produits au cours d'une année à basse luminosité, le LHC ouvre une nouvelle ère de mesures de précision. C'est dans ce cadre que s'insèrent les activités du groupe du LPSC depuis 2004, avec la contribution de trois chercheurs permanents et d'un étudiant en thèse.

La mesure de la section efficace de la production de quarks top célibataires constitue un test précis du modèle des interactions électrofaibles. Dans le modèle standard, le comportement physique du quark top est régi par quatre paramètres : sa masse et les trois éléments de la matrice de mélange faible :  $V_{tb}$ ,  $V_{ts}$  et  $V_{td}$ .  $V_{tb}$  qui

apparaît directement dans la section efficace de production de quarks top célibataires, est déjà fortement contraint par un ajustement global de la matrice de mélange aux mesures obtenues sur les mésons K et B. Une mesure directe de ce paramètre permet alors de tester indépendamment la validité du Modèle Standard.

Dans le Modèle Standard, il existe 3 mécanismes de production de quarks top célibataires, représentés par les diagrammes de la figure 1. Le nombre d'événements attendus dans les canaux mesurables, avec une désintégration en muon ou en électron du W, est typiquement de 500 000 dans la voie-t, 180 000 dans la voie W+t et 20 000 dans la voie-s pour une année à basse luminosité: c.-à-d.  $10 \text{ fb}^{-1}$ . Tout écart dans le taux d'événements détectés avec les valeurs prédites peut être interprété comme le signe d'un défaut du Modèle Standard.

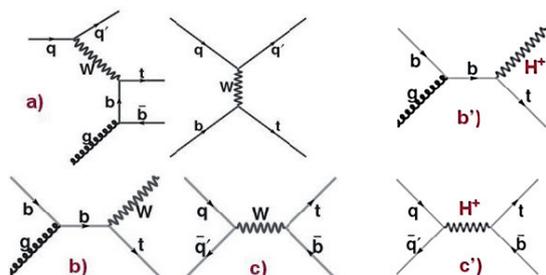


Figure 1: (À gauche) Les 3 mécanismes de production d'un quark top célibataire au LHC: a) voie-t. b) voie de production associée d'un boson W et du top. c) voie-s par l'intermédiaire d'un  $W^*$  virtuel. (À droite) Diagrammes supplémentaires dans les modèles à deux doublets de Higgs. b') production en association avec un top, et c') production dans la voie-s.

Les trois mécanismes de production de quarks top célibataires, d'états finaux très différents, ont été étudiés à l'aide d'analyses spécifiques développées au LPSC. Ces études ont abouti à la détermination de la sensibilité statistique attendue au cours des 3 premières années du LHC pour une luminosité de  $30 \text{ fb}^{-1}$ . Celle-ci serait de l'ordre de 1,5 % pour la voie-t, 4 % pour la voie W+t et environ 10 % pour la voie-s, performances se traduisant par une détermination de  $|V_{tb}|$  au niveau de quelques pourcent. Ces études ont également montré que toutes ces mesures seront dominées par les incertitudes systématiques affectant la procédure de sélection: expérimentalement, les principaux biais proviennent de la méconnaissance de l'échelle d'énergie des jets, de l'efficacité d'étiquetage des jets de b et du taux de mauvaise identification des jets de quarks légers, ainsi que du paramétrage des effets de radiations de gluons des partons initiaux ou finaux, pour un total de 8-10 %. L'estimation des fonds est particulièrement complexe et repose sur l'usage de prédictions théoriques encore imprécises qui induisent une incertitude de 5 % à 10 % selon les processus en jeu.

Parmi les trois canaux traités au LPSC, nous nous sommes concentrés sur la détermination des voie-s et

W+t. La motivation pour l'étude de ces canaux particuliers est leur sensibilité à l'existence de nouveaux bosons chargés, comme le Higgs chargé, prévu dans les modèles supersymétriques, comme le montre la figure 2. De nouvelles études ont été conduites, faisant suite à celle des années précédentes avec cette fois le développement de nouvelles méthodes statistiques, qui permettent d'optimiser la discrimination d'un signal faible envers des processus de fonds importants. Ces méthodes statistiques, basées sur la combinaison de méthodes de vraisemblance, ont été implémentées de façon générique, dans le cadre d'un logiciel pouvant être utilisé par des utilisateurs extérieurs au groupe. Plusieurs fonctions de vraisemblance ont été définies et optimisées contre les processus de fond spécifiques. Leur utilisation a permis dans les deux analyses une amélioration de la pureté des lots attendus de 30 à 40 % en événements de signal à efficacité de sélection égale. Ces performances permettent un meilleur contrôle des incertitudes systématiques qui domineront les mesures dès les premières données. Elles ont également conduit à la définition d'une procédure qui permet de déterminer la normalisation et les formes des fonds sur les données elles-mêmes, en enrichissant les lots en processus spécifiques, de façons indépendantes à partir des fonctions de vraisemblance, par la sélection de régions où le signal attendu est négligeable. Ces travaux ont conduit à la définition d'une stratégie de mesure pour les premières données d'ATLAS.

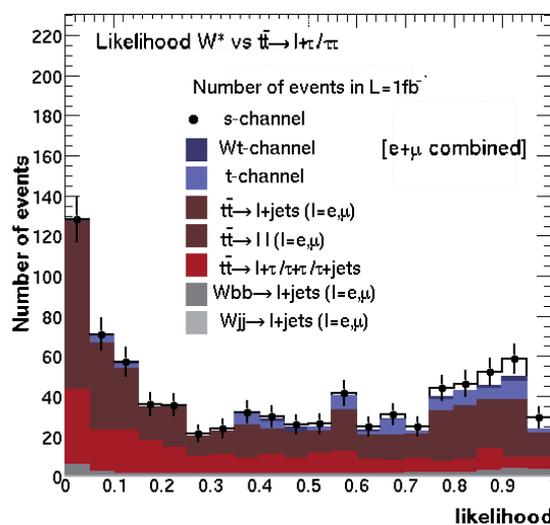


Figure 2: Valeurs de vraisemblance pour la fonction discriminante définie contre le fond constitué par la production de paires de quark top se désintégrant en tau pour une luminosité intégrée de  $1 \text{ fb}^{-1}$ . Le signal est concentré vers 1 et les fonds vers 0.

Ces études sont incluses dans la note ATLAS dans le cadre de l'exercice CSC devant donner lieu à une publication, dont elles constituent deux des trois canaux d'étude, et dont le LPSC s'est vu confier la responsabilité de la coordination et de l'édition. Par ailleurs, le groupe du LPSC est responsable de la production officielle ATLAS des échantillons de fonds générés,

simulés et reconstruits des événements de quarks top célibataires et de la validation des générateurs NLO de ces processus.

Il est à noter que le groupe ATLAS du LPSC a organisé pour la deuxième année consécutive l'atelier « Physique du quark Top: du TeVatron au LHC » qui s'est tenu à Grenoble, réunissant des membres des collaborations travaillant au TeVatron, au LHC, ainsi que des théoriciens impliqués dans la physique du top. Le but de ces rencontres est de favoriser le transfert d'expertise dans les techniques d'analyse, la validation des outils à partir des données, et le dialogue entre expérimentateurs et théoriciens.

## Le potentiel de découverte du Higgs Standard associé à la production du W ou du Z

Le boson de Higgs constitue la dernière particule élémentaire du Modèle Standard non observée à ce jour. Pourtant son rôle est crucial. Son inexistence remettrait sérieusement en cause le mécanisme physique qui confère de la masse aux particules élémentaires.

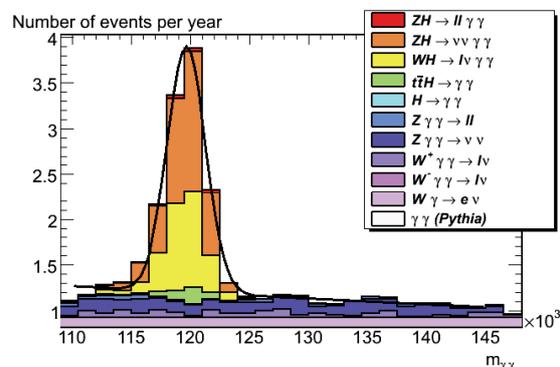
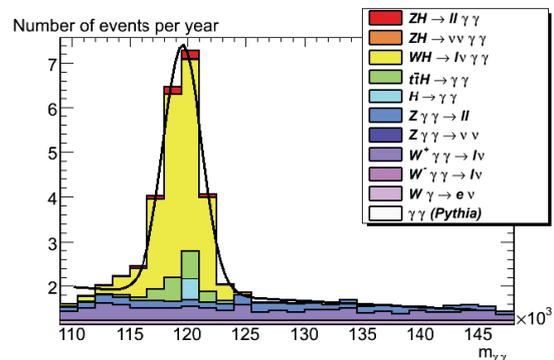
Dans le domaine de faible masse (110-140 GeV) du boson de Higgs, son mode de décroissance dominant en une paire de quark et d'antiquark b est inexploitable du fait de la présence d'un énorme fond QCD. Malgré son très faible rapport d'embranchement (quelques  $10^{-3}$ ), le canal privilégié de découverte est alors la désintégration du boson de Higgs en deux photons. D'un point de vue instrumental, la mesure de ce mode demande une très bonne résolution du calorimètre électromagnétique pour observer cette nouvelle résonance dans le fond diffus à deux photons.

La section efficace de production associée du boson de Higgs avec un boson Z ou W est plus faible que la section efficace de production du boson de Higgs seul, mais lorsque le boson Z ou W se désintègre leptoniquement, le rapport signal sur bruit de fond est plus favorable à la découverte du boson de Higgs. La section efficace de production associée peut également être augmentée par de nouvelles résonances telles que les résonances des modèles de techni-couleur. Le groupe ATLAS du LPSC de Grenoble a pris la responsabilité de l'étude de ce mode.

Quelques milliers d'événements par an pour une luminosité intégrée sur une année de prise de données de  $100 \text{ fb}^{-1}$  sont attendus. Les bruits de fond irréductibles sont la production de deux photons à partir de quarks ou de gluons, et d'une paire de photons associée à un boson Z ou W. Les bruits de fond réductibles sont des événements contenant un photon et un jet, ou une paire de jets dans lesquels les jets sont confondus avec des photons, et dont la masse invariante est celle du boson de Higgs.

Les figures suivantes présentent les résultats d'une étude préliminaire, utilisant la simulation complète

d'ATLAS, pour une année à haute luminosité, dans le cas d'une production associée du boson Z et du boson W respectivement. Le pic du signal apparaît clairement au-dessus du bruit diffus à deux photons.



Les détails de l'étude peuvent être consultés sur cette page wiki: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/WandZassociatedHiggsProd>.

La construction et l'installation des sous-détecteurs d'ATLAS sont maintenant achevées. L'implication du laboratoire dans l'installation de la cryogénie de proximité du calorimètre à argon liquide arrive à son terme. À l'approche des premières collisions, le groupe du LPSC a choisi de participer aux tests de mise en route du calorimètre électromagnétique à argon liquide et de sa chaîne de lecture. Par ailleurs, le groupe maintient sa participation dans la programmation et le suivi du logiciel du calorimètre électromagnétique. Concernant la préparation des analyses physiques, plusieurs thématiques ont émergé qui visent à mettre en évidence de nouveaux processus physiques à partir d'approches complémentaires: la recherche de résonances correspondant à la désintégration de bosons neutres lourds, qui pourrait faire l'objet des premières analyses et la mesure précise de production de quarks top célibataires, qui pourrait constituer un moyen d'observer un boson de Higgs chargé dès les premières années de fonctionnement. Une étude de l'observation du boson de Higgs du Modèle Standard, se désintégrant en deux photons, fait de même l'objet d'une thèse de doctorat. Cette étude suppose une prise de données à la luminosité nominale: c'est-à-dire de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

- 1 <http://ami.in2p3.fr> (Home page pour AMI)
- 2 Présentation à l'International Conference on Computing in High Energy Physics Septembre 2007, Victoria B.C. Canada; à paraître dans le Journal of Physics: Conference Series (JPCS)
- 3 Emil Obreshkov et al. Organization and Management of ATLAS Software Releases. *Submitted to Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*. NIMA-D-06-00734
- 4 F. Ledroit, J. Morel et B. Trocmé, ATL-PHYS-PUB-2006-024, publié dans V. Buescher et al., TeVatron for LHC report: Preparation for discoveries, hep-ph/0608322
- 5 B. Trocmé, PoS HEP2005:323,2006
- 6 M. Schäfer, F. Ledroit et B. Trocmé, ATL-PHYS-PUB-2005-010
- 7 F. Ledroit, G. Moreau et J. Morel, SN-ATLAS-2007-065

## Le groupe DØ

Gérard Sajot, Yannick Arnoud, Florent Chevallier, Chunxu Yu, Sabine Crépe-Renaudin, Bertrand Martin dit Latour (th), Jan Stark

*The DØ experiment is currently accumulating data at the FNAL proton antiproton collider, the TeVatron. The group is working on technical tasks leading to the understanding and improvement of the calorimeter performance as well as the design of software to identify b quarks. It is also involved in improving simulation tools. This work is the basis of the physics analyses which are centered on the measurements of the top pair production cross section and the W mass and width.*

Les expériences CDF et DØ [1] sont installées auprès du TeVatron, le collisionneur du Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) près de Chicago (USA). Le TeVatron produit des collisions entre des faisceaux de protons et d'antiprotons à une énergie dans le centre de masse de 1,96 TeV. Depuis son entrée en service en 1992, le TeVatron détient le record mondial d'énergie dans le centre de masse, et ce, jusqu'au démarrage du Large Hadron Collider (LHC) au CERN. DØ est une collaboration internationale d'environ 550 physiciens répartis dans 83 institutions appartenant à 19 pays. Le groupe de Grenoble participe à DØ depuis mi-1998.

Depuis le démarrage, en 2001, de sa deuxième phase de fonctionnement (Run II), le TeVatron a accumulé environ  $3 \text{ fb}^{-1}$  de données enregistrées avec un record de luminosité instantanée de  $2,8 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Le TeVatron s'est arrêté au printemps 2006 et en été 2007, pour permettre une amélioration du complexe d'accélération et des expériences. À cette occasion, en ce qui concerne DØ, une nouvelle couche de silicium a été ajoutée au plus près du faisceau et le système de déclenchement calorimétrique de niveau 1 a été amélioré afin d'être performant à haute luminosité.

Comme tous les instituts de DØ, le groupe de Grenoble contribue à des tâches techniques et à des analyses de physique.

### Contributions techniques

Elles concernent le suivi et l'amélioration des performances du calorimètre, l'étude de l'efficacité de reconstruction et d'identification des jets et la mise au point d'un algorithme d'identification des jets issus des quarks b.

### Étalonnage des calorimètres

La précision mécanique de la fabrication des modules des calorimètres était adaptée pour le Run I, mais avec la réduction du temps d'intégration au Run II (132 ns), les imprécisions mécaniques résiduelles donnent lieu à des variations allant jusqu'à 20 % entre les gains des différentes cellules. Une méthode mise au point à Grenoble a été utilisée pour étalonner toutes les cellules des calorimètres de DØ avec une grande précision. La méthode est basée sur des données de collision qui sont enregistrées à l'aide d'un déclenchement spécifique, développé par un membre du groupe.

Celui-ci a dirigé le travail des experts chargés d'extraire les constantes d'étalonnage finales.

### Identification des jets

À DØ, les efficacités de reconstruction et d'identification des jets sont essentiellement mesurées sur des échantillons « di-jet », par la méthode dite « tag and probe ». Cependant, ces mesures sont peu fiables pour les jets de basse quantité de mouvement transverse ( $p_T$ ). Un des membres du groupe a développé une procédure pour obtenir ces efficacités à partir d'événements Z+jet, pour lesquels le boson Z recule face à un jet de faible  $p_T$  (figure 1) [2]. Il s'est également impliqué dans l'identification des jets dans un environnement à haute luminosité. L'augmentation des performances de l'accélérateur résulte en un nombre accru d'interactions proton-antiproton lors d'une collision. Pour parvenir à distinguer les jets provenant de l'interaction dure et ceux produits lors d'interactions additionnelles, l'information calorimétrique est comparée aux traces issues des différents vertex reconstruits. La discrimination est basée sur la quantité de mouvement des traces que contient le jet, ainsi que sur la probabilité pour chaque vertex d'être le vertex primaire.

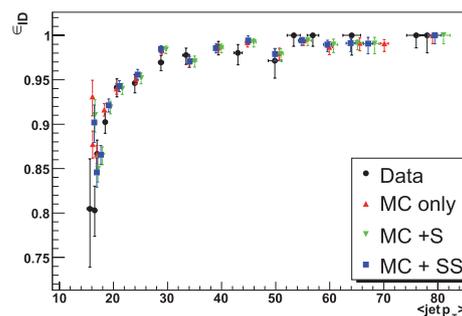


Figure 1: Distribution de l'efficacité d'identification des jets en fonction de leur quantité de mouvement transverse ( $p_T > 13 \text{ GeV}$ ) dans le calorimètre central pour les données, le MC sans correction, le MC+S (S = correction de smearing seulement), le MC+SS (SS = correction de smearing et de shifting) [3].

### Étiquetage des jets de quark b avec des électrons non isolés

Les hadrons beaux ont un temps de demi-vie long (environ 1,5 ps) et un rapport d'embranchement semi-leptonique ( $lvX$ ) d'environ 10 % par saveur de lepton. Cette dernière propriété est mise à profit dans les « soft

lepton tags », algorithmes qui recherchent la présence de leptons dans les jets hadroniques.

Le groupe travaille sur le « soft electron tag ». L'identification d'électrons dans les jets a été améliorée par la prise en compte des informations du détecteur de pied de gerbe (partie centrale), conçu pour améliorer la discrimination électron/pion. Les tests sur les données de collision ont conforté l'analyse Monte-Carlo (MC). Ainsi, sur 100 jets beaux énergétiques, 20 ont un électron et 10 sont sélectionnés par l'algorithme. Le taux de mauvais étiquetage est de 2,5 % (jets énergétiques de saveurs légères u, d, s pris pour des jets de saveurs lourdes c ou b). Ces performances sont proches de celles obtenues en utilisant l'étiquetage par muon [4].

## Analyses de physique

Elles sont centrées sur deux thèmes : la mesure de la section efficace de production de paires top-antitop (notées  $t\bar{t}$  dans la suite) et la mesure de la masse et de la largeur du boson W.

### Mesure de la section efficace de production $t\bar{t}$

À l'heure actuelle, les propriétés du quark top sont encore mal connues car sa découverte est récente (1995 par CDF et DØ) et du fait de sa masse (mesure combinée CDF et DØ :  $170,9 \pm 1,8$  GeV), sa section efficace de production est faible (environ 7 pb). Au TeVatron, la production de paires  $t\bar{t}$  se fait par l'annihilation d'un quark et d'un anti-quark ou par la fusion de gluons (figure 2). Étant très massif, le top se désintègre avant même d'avoir eu le temps de s'hadroniser (durée de vie de l'ordre de  $0,5 \cdot 10^{-24}$  s). Dans le modèle standard (MS) le quark top se désintègre dans quasiment 100 % des cas en un quark b et un boson W.

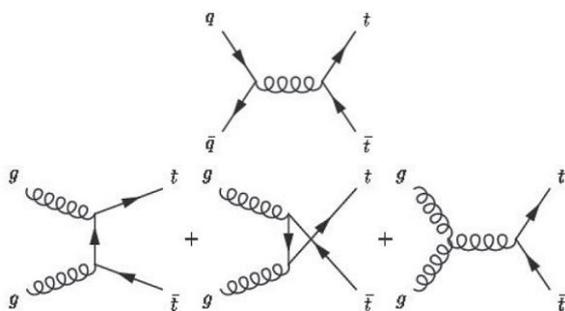


Figure 2 : Modes de production des paires  $t\bar{t}$  au TeVatron : par annihilation de quarks (85 % des cas) et par fusion de gluons (15 % des cas).

La détermination précise de la masse du top est une mesure importante car, associée à la mesure de celle du boson W, elle permet de contraindre fortement, s'il existe, la masse du boson de Higgs. En effet de par sa masse élevée, le quark top se couple de façon privilégiée au boson de Higgs supposé être à l'origine du mécanisme qui rend massives les particules du MS. Enfin, toute déviation par rapport aux prédictions du MS ouvrirait une fenêtre d'exploration vers de la nouvelle physique.

Les analyses se différencient en fonction du mode de désintégration du W. On distingue donc les états finaux « dileptons » pour lesquels les deux W se désintègrent en lepton et neutrino, des cas mixtes « lepton+jets », pour lesquels un des W se désintègre en lepton et neutrino et l'autre en deux quarks et du cas « multi-jets » pour lequel les deux W se désintègrent en quarks. Le groupe a contribué à l'étude de ces deux premières configurations dans les canaux 2 électrons + énergie transverse manquante (MET) + jets et lepton (électron et muon) + MET + quatre jets dont deux sont issus de quarks b.

D'autres types de processus conduisent au même état final. Parmi ceux-ci, la production :

- D'un boson W ou Z accompagné de jets de b ou de jets de quarks légers identifiés comme b.
- De quarks et de gluons conduisant à des événements multi-jets que l'on confond avec les événements top si l'un des jets est mal reconstruit ou est identifié comme un lepton.
- De dibosons (WW, WZ et ZZ) si l'une des particules issue de leur désintégration est mal reconstruite.

### Analyse « lepton+jets »

Elle utilise le fait que 2 des jets produits dans un événement  $t\bar{t}$  proviennent de quark b. Or, dans environ 20 % des cas, un b se désintègre avec un muon dans l'état final. Ainsi, la présence d'un muon dans un jet permet de signer l'existence d'un quark b. En tenant compte des effets de reconstruction, la probabilité d'étiqueter un événement  $t\bar{t}$  de cette façon varie entre 15 et 20 %.

Afin d'estimer la section efficace de production il est nécessaire d'évaluer le nombre d'événements de fond restants dans la sélection finale. L'efficacité des événements top, diboson et Z est évaluée par simulation Monte-Carlo, ainsi que l'efficacité d'étiquetage des événements W+jets, en fonction de la saveur des jets. Par contre, la normalisation du nombre d'événements Z+jets est faite sur les données, en effet les sections efficaces de ces processus en fonction du nombre de jets ne sont pas, pour le moment, données de façon fiable par les MC. De même, le nombre d'événements W+jets avant étiquetage des b ainsi que le nombre d'événements (QCD) sont évalués directement à partir des données.

L'analyse est conduite quel que soit le nombre de jets présents : on s'assure ainsi que les fonds sont correctement évalués sur les événements qui ont 1 ou 2 jets et pour lequel le signal est négligeable (figure 3). La section efficace de production de paires  $t\bar{t}$  est mesurée pour les cas où le nombre de jets est supérieur ou égal à 3 en prenant en compte simultanément dans un maximum de vraisemblance les canaux « électron + jets » et « muon + jets » et les erreurs statistiques et systématiques associées.

La section efficace mesurée est de  $\sigma_{t\bar{t}}(1+\text{jets}) = 7,3 + 2,0 - 1,8$  (stat + syst)  $\pm 0,4$  (lumi) pb [5], pour une luminosité d'environ  $425 \text{ pb}^{-1}$ . Cette mesure est en accord avec deux autres mesures dans le même canal. Ces dernières utilisent soit une autre méthode d'étiquetage

des quarks b (qui tire profit de la « longue » durée de vie des hadrons issus des b) soit uniquement la topologie particulière des événements  $t\bar{t}$ . Ces mesures pourront ensuite être combinées avec les résultats des autres analyses (« dilepton » ou « multi-jets »).

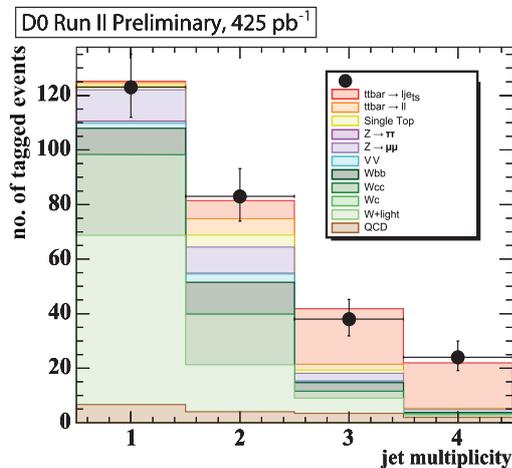


Figure 3 : Nombre d'événements sélectionnés, après étiquetage des jets de b, dans les analyses « électron + jets » et « muon + jets » combinées, pour  $425 \text{ pb}^{-1}$  de données (points noirs) et les contributions attendues pour les différents bruits de fond ainsi que pour la production  $t\bar{t}$ .

### Analyse « dilepton »

Il s'agit d'une analyse purement topologique qui repose sur la présence de deux électrons isolés, d'énergie transverse manquante et d'au moins deux jets. Elle a été réalisée sur les données enregistrées par DØ entre avril 2002 et février 2006 et correspondant à une luminosité intégrée d'environ  $1 \text{ fb}^{-1}$ . Il a été observé que l'impulsion transverse du boson Z ( $P_T$ ) n'est pas bien modélisée par le générateur ALPGEN utilisé par la collaboration. Une procédure de pondération a donc été mise au point pour accorder la distribution du  $P_T$  du Z dans la simulation MC avec celle qui est observée dans les données. Il a fallu aussi déterminer l'efficacité de déclenchement des événements afin de l'appliquer au MC. Le nombre d'événements de fond provenant de jets faussement identifiés comme électrons dans les événements  $W$ +jets et multijets est estimé à partir des données par une procédure de maximum de vraisemblance sur la distribution d'une variable de qualité de l'électron. De même le nombre d'événements dus à une mesure erronée de la MET est obtenu à partir des données. On utilise pour cela le taux d'événements, dans un échantillon  $\gamma + \geq 2$ jets, ayant une MET supérieure à la valeur de coupure de l'analyse finale. Il a été vérifié qu'à toutes les étapes de l'analyse, il y a accord à la fois en forme et en nombre d'entrées dans les distributions des données et du MC. La section efficace mesurée (pour une masse de top de 175 GeV) est [6] :  $\sigma_{t\bar{t}} = 9,6 + 3,2 - 2,7 \text{ (stat)} + 1,9 - 1,6 \text{ (syst)} \pm 0,6 \text{ (lumi)} \text{ pb}$ . Cette analyse a été combinée avec les analyses lepton+trace et dilepton [7] pour donner une section efficace égale à :  $6,2 + 0,9 - 0,9 \text{ (stat)} + 0,8 - 0,7 \text{ (syst)} \pm 0,4 \text{ (lumi)} \text{ pb}$ .

### Mesure de la masse du boson W et de sa largeur

La masse du boson W est connue actuellement avec une incertitude de 25 MeV, soit une précision de 0,0003. L'objectif est de réduire cette incertitude sur la masse du W afin de contraindre plus fortement la masse du Higgs. Par exemple une incertitude de 2,1 GeV sur la masse du top se traduit par une incertitude relative de 18 % sur la masse du Higgs. Comparativement, il faut une incertitude de 12 MeV sur la masse du W pour avoir la même incertitude relative de 18 % sur la masse du Higgs. Actuellement, c'est donc la précision sur la masse du W qui est le facteur limitant pour contraindre le Higgs.

Au Tevatron la production du W est dominée par l'annihilation quark-antiquark. L'étude s'effectue dans le cas où le W se désintègre en électron et neutrino. Les seules grandeurs mesurées disponibles sont donc relatives à l'électron et au système de recul, c'est-à-dire tout ce qui est déposé dans le calorimètre. La masse est mesurée par l'intermédiaire de la masse transverse. La distribution obtenue dans les données est comparée à celles obtenues par simulation pour différentes masses de W (par pas de 5 MeV). La meilleure valeur est trouvée par maximum de vraisemblance [8]. Une telle mesure de précision nécessite une compréhension très détaillée de la réponse des particules qui traversent le détecteur et en particulier du calorimètre. Cette étude coordonnée par l'un de membres du groupe a nécessité plusieurs années de travail d'une équipe dédiée. Il a fallu mettre au point de nouvelles techniques d'étalonnage, de mesures de la quantité de matière non instrumentée devant le calorimètre, des simulations plus détaillées du développement des gerbes... Ce travail a d'ores et déjà permis d'améliorer d'autres mesures de précision publiées par DØ. La masse du W devrait être publiée dans les mois qui viennent. Cette analyse permettra aussi la mesure de la largeur du W par ajustement de la partie haute de la distribution de la masse transverse.

- 1 <http://www-d0.fnal.gov> V.M. Abazov et al (DØ Collaboration), Nucl. Instrum. Methods A 565, 463 (2006)
- 2 DØ note 5170, B. Andrieu et al, Jet-ID Certification for Run IIa Data in p17
- 3 DØ note 4914, N. Makovec and J.-F. Grivaz, Shifting, Smearing and Removing Simulated Jets
- 4 DØ note 4867, K. Hanagaki and J. Kasper Identification of b-jet by Soft Muon
- 5 DØ note 5257-conf, F. Chevallier and S. Crépe-Renaudin, Measurement of the  $t\bar{t}$  Production Cross section in pp-bar collisions at  $\sqrt{s}=1,96 \text{ TeV}$  using soft muon b-tagged lepton + jets events
- 6 DØ note 5386, B. Martin dit Latour et al, Measurement of the  $t\bar{t}$  Production Cross section at  $\sqrt{s}=1.96 \text{ TeV}$  in ee Final States Using p17 Data Set
- 7 DØ note 5477-conf Y. Arnoud et al, Combined  $t\bar{t}$  production cross section in lepton + track and dilepton final states using  $1 \text{ fb}^{-1}$  of data
- 8 DØ note 5388, P. Pétrouff and J. Stark, Proposal to perform a blind measurement of the W mass in Run II

## Le projet ILC

Jean-Yves Hostachy, Laurent Morin (th)

*The next major project of particle physics will be the International Linear Collider ILC: a linear accelerator in which electrons and positrons will collide with energies of 500 to around 1000 GeV. The LPSC-Grenoble is involved in the R&D activities for the Large Detector Concept (LDC) and in particular in the electromagnetic (EM) calorimeter (i.e. design of the mechanics of the end-caps, test of EM prototypes, analysis of test beam data, performance studies, design of the calibration and readout (low power 12 bit ADC) parts of the integrated electronics circuit); plus a contribution in the micro-vertex detector (i.e. design of the readout electronics: 4 or 5 bit ADC).*

Au-delà du LHC, le prochain projet majeur en physique des particules sera l'ILC « International Linear Collider »: un accélérateur linéaire dans lequel des électrons et leurs anti-particules (positrons) entreront en collision initialement avec une énergie disponible dans le centre de masse comprise entre 90 et 500 GeV, qui pourra être portée dans une seconde étape vers 1 TeV. Le but de l'ILC est d'essayer de répondre aux questions concernant la nature fondamentale de la matière, de l'énergie, de l'espace et du temps, de la matière noire, de l'énergie noire et de l'existence de dimensions supplémentaires. La technologie de base de cet accélérateur est désormais établie et une partie de la communauté scientifique s'efforce de définir les concepts concernant les détecteurs.

La contribution du LPSC porte sur le concept de détecteur européen LDC « Large Detector Concept ». Nous participons à la conception de l'électronique de lecture:

- Du sous-détecteur de vertex (ou détecteur à « pixels »), collaboration CMOS.
- Du calorimètre électromagnétique (EM), fait de silicium et de tungstène (Si/W), collaboration CALICE.

Nous sommes aussi engagés dans la construction mécanique des bouchons EM (structure alvéolaire composite: tungstène + fibres de carbone, géométrie, simulation des déformations, étude du système d'accrochage, étude du système de refroidissement en raison du très grand nombre de voies électroniques). Enfin nous participons aux tests en faisceau de prototypes de calorimètres EM et hadroniques, à l'analyse des données recueillies, ainsi qu'à la simulation des performances des bouchons EM.

### Étude de la réponse des bouchons EM

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'université Hassan II de Casablanca (Maroc). Il a fait l'objet de 2 notes soumises à un comité de lecture: LC-DET-2007-004 et LC-DET-2005-011. Outre l'étude de la résolution en énergie concernant la détection d'électrons et de photons à différentes énergies et à différentes positions selon la technique classique qui consiste à mesurer le dépôt d'énergie dans les couches actives de silicium (signal analogique), nous avons aussi estimé les performances des bouchons à partir du nombre de cellules touchées dans chaque couche (signal numérique). Bien que la réponse concernant la technique numérique ne soit pas linéaire, il est cependant possible de remonter à l'énergie de la particule incidente avec

une paramétrisation adéquate. De plus, il est intéressant de constater (figure 1) qu'au-dessous de 4 GeV la technique numérique l'emporte (meilleure résolution) sur la technique analogique. Enfin, en pondérant correctement les deux techniques (qui ne sont pas totalement corrélées) il est évidemment possible d'obtenir une amélioration de la résolution en énergie.

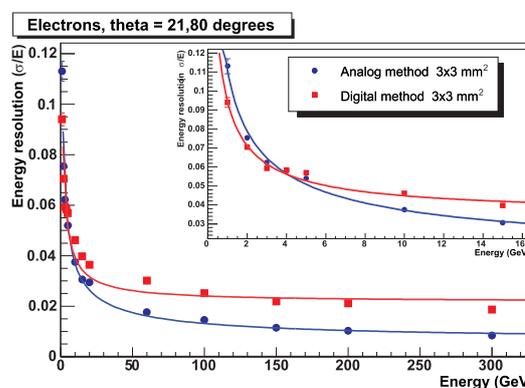


Figure 1: Résolutions en énergie obtenues à partir d'une mesure analogique (courbe bleue) et numérique (courbe rouge).

### Tests en faisceau et analyse des données

Des prototypes du calorimètre EM et hadronique ont été testés au CERN en 2006 et 2007 (figure 2). Nous avons participé à toutes les campagnes de tests (juillet, août, septembre et octobre 2006, juillet et août 2007) et envisageons de poursuivre cette tâche à Fermilab aux USA où sont prévus de nouveaux tests en particulier concernant le futur module EUDET (~1,5 m de long) du calorimètre EM.

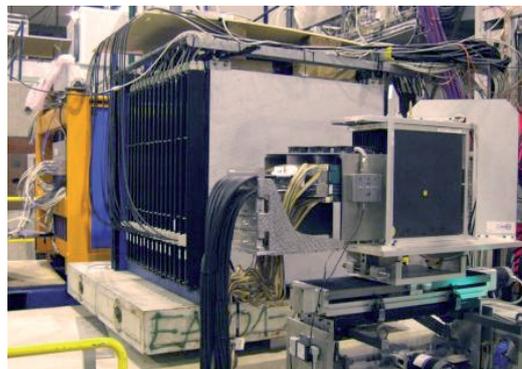


Figure 2: Dispositif expérimental testé au CERN, au premier plan, le prototype de calorimètre EM (~10 000 voies), suivi du prototype de calorimètre hadronique analogique, et en arrière plan, le détecteur appelé « tail catcher ».

Nous prenons aussi une part très active à l'analyse des données en particulier concernant la colorimétrie EM : technique d'identification des électrons à partir de la taille des gerbes, technique d'alignement « off-line » des différentes couches actives des cellules de détection, techniques de corrections des effets dus aux anneaux de garde des matrices de diodes, étude de la résolution en énergie sans ou avec rotation du prototype de calorimètre EM (figure 3), linéarité, comparaisons avec des simulations Monte-Carlo. Cinq notes soumises à un comité de lecture : CAN-001 à 005 (2007) concernant l'ensemble des tests en faisceau ont été rédigées, et un article de synthèse est en voie de rédaction.

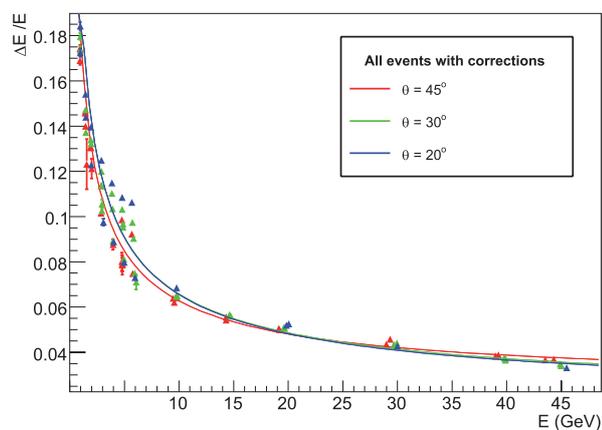


Figure 3 : Résolution en énergie en fonction de l'angle d'incidence des électrons et de leur énergie et après correction des effets dus aux anneaux de garde.

## Les activités R&D

Les activités R&D concernent :

### La micro-électronique

- Conception et réalisation de l'électronique de lecture et de codage pour les pixels MOS du détecteur micro-vertex développés par l'IPHC de Strasbourg (les 5 couches de détection de ce détecteur conduisent à environ 300 millions de pixels). Chaque canal d'électronique comporte un échantillonneur-bloqueur et un ADC « pipe line » d'une dynamique de 4 ou 5 bits. Cette réalisation est effectuée en collaboration avec l'IPHC de Strasbourg. La taille du circuit est extrêmement réduite : de l'ordre de  $1 \text{ mm} \times 20 \mu\text{m}$ . L'extraction des signaux ( $\sim 1 \text{ mV}$ ), la faible consommation ( $\sim 1 \text{ mW}$ ) et la rapidité ( $> 10 \text{ MHz}$ ) constituent des contraintes drastiques. Les cellules de détection (« pixels ») et l'électronique seront disposées sur le même support monolithique. Deux prototypes ont déjà été développés et les résultats ont fait l'objet d'un article dans la revue IEEE Transactions on Nuclear Science 54 (2007) 1195-1200. Une 3<sup>e</sup> version est en cours de test et la 4<sup>e</sup>, comportant 32 voies, vient d'être réceptionnée (figure 4).

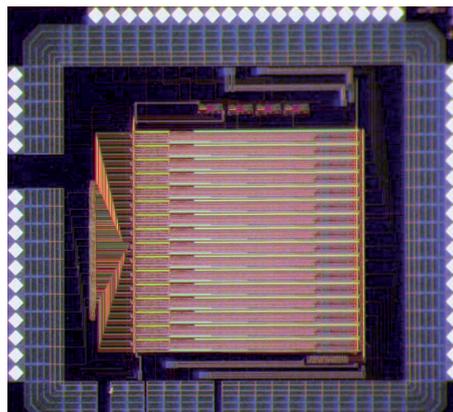


Figure 4 : Circuit de 32 canaux d'ADC pipeline 5 bits, 25 MHz.

- Conception de circuits convertisseurs analogiques-numériques rapides de type « pipe line » et de grande dynamique (12 bits) pour le calorimètre électromagnétique (EM). La faible consommation est un paramètre critique pour cette étude : nos premiers résultats ont un facteur de qualité (consommation/vitesse) de  $1,5 \text{ mW/MHz}$  à l'état actif. Le calorimètre EM sera doté d'environ 83 millions de voies électroniques. Un prototype sans échantillonneur-bloqueur a été développé et testé, un 2<sup>e</sup> avec échantillonneur-bloqueur est en cours de test et un 3<sup>e</sup> (avec échantillonneur-bloqueur) nous a été livré récemment (figure 5).

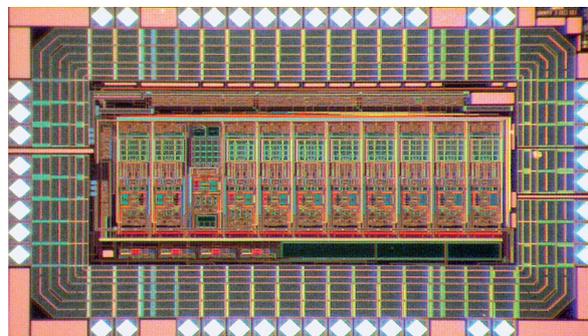


Figure 5 : Circuit d'ADC pipeline 12 bits, 25 MHz, reçu en septembre 2007.

Tous les circuits sont polarisés en mode pulsé très rapide (extinction à  $1/1000$  en  $1 \mu\text{s}$ ), pour rendre la dissipation proportionnelle au rapport cyclique du faisceau ( $\sim 1 \text{ ms}$  toutes les  $200 \text{ ms}$ ).

- Conception d'un circuit électronique pour l'étalonnage du calorimètre EM (DAC  $\Sigma\Delta$  de 16 bits). Un convertisseur DAC de type  $\Sigma\Delta$  est en cours de réalisation. La phase de simulation est presque achevée et le 1<sup>er</sup> prototype sera envoyé en fonderie en janvier 2008.

On notera que les laboratoires du CNESTEN (Rabat, Maroc) et IXL de Bordeaux contribuent ponctuellement à certaines phases de ces études.

### La conception mécanique et le prototypage du calorimètre EM

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec les laboratoires LLR de Palaiseau, LAL d'Orsay et l'Université de Manchester.

#### Architecture générale des bouchons EM: dessins avancés

La masse du tungstène dans chaque bouchon EM est d'environ 16 tonnes. Des travaux de simulation ont donc été entrepris afin d'étudier le comportement mécanique de ce sous-détecteur subdivisé en 12 modules de 3 types différents (voir figure 6). La structure alvéolaire (tungstène + fibre de carbone) sera remplie de plaques de tungstène prises en sandwich entre 2 fines couches d'un milieu actif (matrices de diodes en silicium). La tenue mécanique de la structure porteuse composite et les aspects de déformation ont déjà fait l'objet de travaux suivis de dessins avancés.

#### Assemblage et positionnement du calorimètre EM

Le système d'accrochage (seulement 3 cm sont disponibles entre les calorimètres EM et hadronique) constitue aussi un défi que nous tentons de relever. Des travaux concernant l'implantation et la tenue à l'arrachement des inserts supports ainsi que la validation du système d'assemblage et de positionnement sont en cours de réalisation.

#### Définition du système de refroidissement

Enfin un dispositif de refroidissement paraît nécessaire pour évacuer la chaleur produite par le grand nombre (~ 83 millions) de voies électroniques. Là encore le peu de place disponible (le calorimètre EM doit rester le plus compact possible) est évidemment source de difficultés.

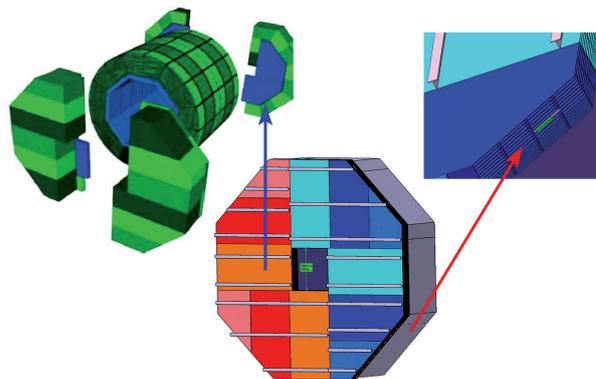


Figure 6 : À gauche, les calorimètres du détecteur LDC, en vert : hadronique, en bleu : électromagnétique. Au centre, un bouchon du calorimètre EM, composé de 12 modules de 3 types différents. À droite, une tranche de l'un des modules avec une plaque de détection.

## Le groupe UCN: nEDM et GRANIT

*Dominique Rebreyend, Fabrice Naraghi, Guillaume Pignol (th), Konstantin Protassov, Gilles Quéméner, Stéphanie Roccia (th)*

*The UCN group aims at studying the fundamental interactions and symmetries using Ultra Cold Neutrons (UCN) and is currently involved in 2 projects: the nEDM experiment at the Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen, Switzerland) and the GRANIT project at the Institut Laue Langevin (ILL, Grenoble, France). UCNs are very low energy neutrons ( $\sim 100$  neV) with very large wave-lengths as compared to the interatomic distances ( $\lambda_{UCN} \sim 100$  nm). They can therefore be stored in bottles and are at the origin of the most precise measurements of the neutron properties such as its lifetime and electric dipole moment (EDM). Due to their extremely low energy, they are also sensitive to the gravitational interaction, a property which is used in the GRANIT project.*

Le groupe UCN a pour but d'étudier les interactions et les symétries fondamentales à l'aide de neutrons ultra froids (UCN) et est impliqué dans deux projets: l'expérience nEDM au Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen, Suisse) et le projet GRANIT à l'Institut Laue Langevin (ILL, Grenoble, France). Les UCN sont des neutrons de très basse énergie ( $\sim 100$  neV) dont les longueurs d'onde associées sont grandes devant les distances interatomiques ( $\lambda_{UCN} \sim 100$  nm). Ils peuvent ainsi être stockés dans des enceintes et sont à la base des mesures les plus précises des propriétés du neutron telles que sa durée de vie ou son moment électrique dipolaire (EDM). Du fait de leurs énergies extrêmement basses, ils sont aussi sensibles à l'interaction gravitationnelle, propriété utilisée dans le projet GRANIT.

### Moment Électrique Dipolaire du neutron: nEDM

L'expérience nEDM de mesure du moment électrique dipolaire du neutron (par la méthode des champs séparés oscillants de Ramsey) se place dans le cadre général de la recherche de nouvelles sources de violation de CP, notamment dans le secteur hadronique. La plupart des extensions actuelles du Modèle Standard (MS), comme par exemple la SUSY, prédisent des valeurs de l'EDM du neutron qui sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur à la valeur prédite par le MS ( $\sim 10^{-31}$  e.cm). Ces prédictions se situent juste sous la limite actuelle de  $3.10^{-26}$  e.cm mesurée par la collaboration RAL-Sussex à l'ILL [1] et sont donc dans la gamme de valeurs accessibles par notre expérience. La mesure d'un moment électrique dipolaire non nul du neutron ou de toute particule élémentaire serait la signature directe de l'existence d'une nouvelle physique.

Jusqu'à fin 2006, la collaboration nEDM était composée d'une trentaine de physiciens venant du LPC de Caen, de l'Université Jagellonian de Cracovie, du JINR de Dubna, de l'Université de Fribourg, du LPSC de Grenoble et du PSI de Villigen. Début 2007, nous avons été rejoints par des groupes de l'Université Catholique de Louvain, de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence et de l'Université Technique de Munich, formant ainsi une collaboration d'une quarantaine de membres. Le projet nEDM se déroule en trois phases.

La première (2005-2008) consiste à reprendre en main et à améliorer le spectromètre RAL-Sussex à l'ILL. La deuxième phase (2009-2010) verra le transport de cet appareillage au PSI et son utilisation pour une première mesure auprès de la nouvelle source d'UCN actuellement en construction (démarrage prévu fin 2008-début 2009). Le spectromètre amélioré permettra alors d'atteindre une sensibilité de l'ordre de  $5.10^{-27}$  e.cm. En parallèle nous concevons un nouveau spectromètre aux performances optimisées pour la densité d'UCN de la source de PSI ( $\sim 1000$  UCN/cm<sup>3</sup>). À partir de 2011, au cours de la troisième phase du projet, ce nouveau spectromètre permettra d'abaisser la limite jusqu'à  $\sim 5.10^{-28}$  e.cm, c'est-à-dire un gain de deux ordres de grandeur par rapport à la limite actuelle.

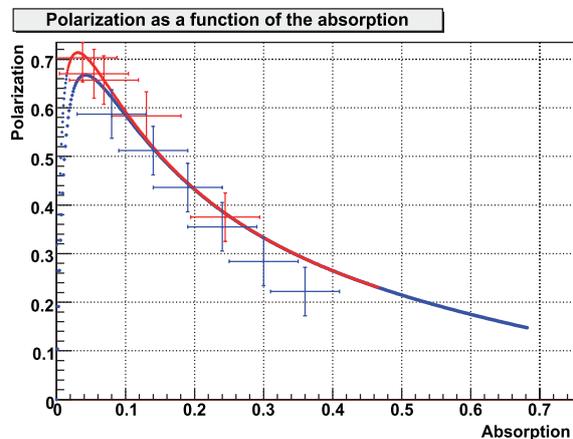


Figure 1 : Évolution de la polarisation du mercure en fonction de l'absorption de la lumière, proportionnelle à la quantité de mercure stockée.

La reprise en main du spectromètre RAL-Sussex a été obtenue grâce à un effort soutenu des services techniques du laboratoire. Une grande partie de l'appareillage a été renouvelée et a permis de retrouver des performances identiques à celles qu'avait le spectromètre à l'origine. Le groupe a notamment pris en charge l'étude et l'amélioration de la magnétométrie mercure qui fait l'objet de la thèse de S. Roccia et qui est utilisée pour corriger les variations du champ magnétique dans l'enceinte où précèdent les neutrons. De nombreuses mesures ont été effectuées sur le spec-

tromètre ainsi qu'au laboratoire (avec l'expertise du groupe Plasma) et ont permis de comprendre les divers processus impliqués dans cette mesure : production de la lumière UV (253 nm), polarisation par pompage optique nucléaire et transport de mercure polarisé, phénomènes impliqués dans la dépolarisation des atomes, phénomènes d'absorption, analyse de la polarisation... Ces études se sont accompagnées du développement d'une simulation numérique dont les résultats sont en très bon accord avec les mesures (figure 1). Cette simulation sera l'outil de base pour améliorer le système existant et optimiser celui du futur spectromètre.

Le groupe est également responsable de la coordination des calculs liés à l'optimisation du champ magnétique (bobines et blindages). Pour effectuer cette tâche, plusieurs logiciels à notre disposition ont été écartés à cause de leur manque de précision ou de l'impossibilité de simuler un blindage complexe. Nous avons alors entrepris la mise au point d'un nouveau programme de calcul de champ développé dans l'environnement de travail de ROOT (CERN) et basé sur la méthode des intégrales de volumes finis. L'écriture de ce programme vient de s'achever, il peut maintenant être utilisé pour calculer des blindages multicouches fins (2 mm) de grandes dimensions (4 m de long - 2 m de diamètre) comme celui montré sur la figure 2. Il permet aussi d'optimiser (par algorithmes évolutionnaires) la géométrie des bobines nécessaires à l'obtention d'un champ magnétique homogène et uniforme dans le volume de la chambre de précession des neutrons. Vu les contraintes que nous avons sur l'appareillage, le champ magnétique sera créé par une combinaison de bobines dont les différentes formes sont celles montrées sur la figure 3.

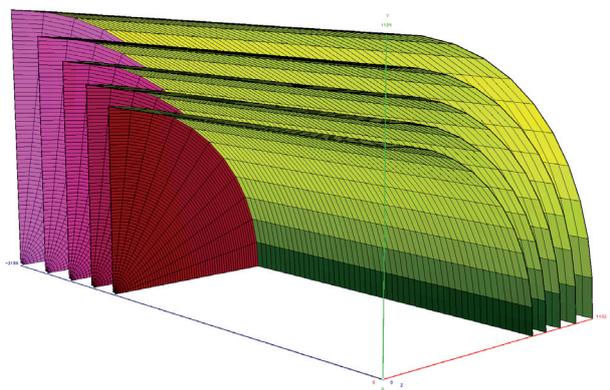


Figure 2 : Exemple de blindage réaliste ayant été simulé avec notre logiciel.

En parallèle, nous avons utilisé le spectromètre nEDM à l'ILL pour mettre une limite inférieure sur le temps d'oscillation  $n$ - $n'$  entre un neutron ordinaire et son image dans un éventuel monde miroir. L'hypothèse de ce monde miroir a été avancée pour restaurer globalement la symétrie gauche-droite de l'univers et a

connu récemment un regain d'intérêt comme candidat à la matière noire. Dans le cas où un tel monde parallèle existerait, le neutron ordinaire et son partenaire (dégénérés en masse) subiraient des oscillations  $n$ - $n'$ . L'interaction d'un champ magnétique ordinaire avec le neutron a pour conséquence de lever la dégénérescence entre les partenaires et de diminuer l'amplitude de transition  $n$ - $n'$ . En comparant le temps de stockage des neutrons dans la chambre de précession avec et sans champ magnétique, on est sensible au temps d'oscillation car un neutron miroir n'interagissant pas avec la matière ordinaire quitterait le piège. Nous n'avons observé aucune variation et avons pu mettre une limite sur ce temps d'oscillation  $\tau_{n-n'} > 103$  s (95 % CL) [2], améliorant ainsi de 2 ordres de grandeur la précédente limite.

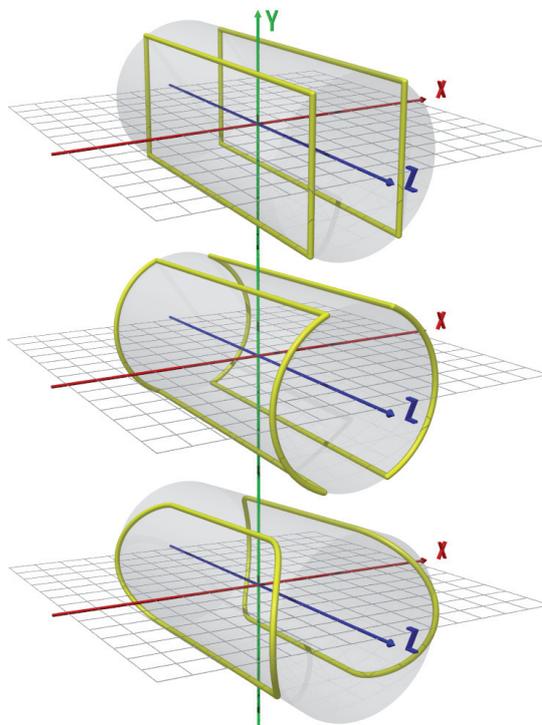


Figure 3 : Différentes formes de bobines qui seront combinées pour obtenir un champ magnétique uniforme.

## GRANIT

Depuis 2004, notre laboratoire est impliqué dans le projet GRANIT (GRAvitational Neutron Induced Transitions) d'étude des transitions induites entre les états quantiques du neutron dans le champ de pesanteur. Ce projet fait suite à une série d'expériences réalisées récemment à l'ILL qui ont permis la première observation des états quantiques du neutron confiné par le champ gravitationnel. L'objectif de GRANIT est de concevoir et de construire un spectromètre gravitationnel à neutrons d'ultra haute résolution en énergie de seconde génération. Ce nouveau spectromètre permettra non seulement de maintenir des UCN sur les états quantiques dans le champ gravitationnel pendant une durée de l'ordre d'une seconde, mais encore observer

les transitions résonnantes entre ces états. Notre intention est d'effectuer, pour la première fois au monde, la mesure directe de l'énergie de transition de ces états quantiques. Ce spectromètre sera en outre un outil unique pour un large éventail d'études en physique des particules et des interactions fondamentales.

## Physique du spectromètre

L'année 2006 a été consacrée à la définition du programme scientifique de GRANIT et des mesures expérimentales. Au début de l'année, nous avons organisé à Grenoble un workshop international qui a réuni plus de 70 physiciens de 12 pays et qui nous a permis de passer en revue les phénomènes physiques pouvant être étudiés dans cette expérience.

Le but principal de la future expérience GRANIT sera la mise en évidence des transitions résonnantes dans ce système quantique. De surcroît, cette expérience peut être considérée comme un outil dans différents domaines de physique. L'observation et surtout la détermination précise des énergies de transition permettraient de réaliser une étude détaillée des propriétés du système quantique. Nous pourrions, par exemple, améliorer la limite existante sur la charge électrique du neutron ou étudier les propriétés de l'interaction gravitationnelle à l'échelle caractéristique du système.

Par exemple, nous avons déjà montré que l'étude des états quantiques pouvait donner une information pertinente sur les propriétés de l'interaction gravitationnelle à l'échelle microscopique et nanoscopique, en plaçant des limites supérieures sur les forces supplémentaires (qui apparaissent, par exemple, dans les modèles de dimensions supplémentaires) qui modifieraient le potentiel gravitationnel à ces distances. Plus récemment, nous avons montré [3] que l'expérience précédente avec des neutrons non polarisés permet d'établir une limite particulièrement compétitive (et, dans un certain domaine de taille de l'interaction, unique) sur les forces à courte portée dépendantes du spin. Ce type de forces apparaît, par exemple, dans le modèle d'axion – la particule hypothétique pouvant expliquer l'absence de violation forte de la symétrie CP, ce modèle fournissant en outre un mécanisme pour l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers. Cette étude est d'autant plus intéressante que l'expérience récente PVLAS a prétendu observer un signal indiquant l'existence possible de l'axion.

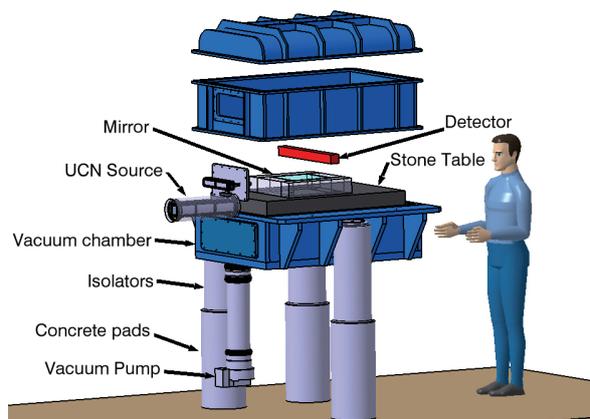
## Conception et construction du spectromètre

Dans la conception générale du spectromètre nous avons repris les éléments et le savoir-faire développés pour la construction de l'appareillage utilisé dans les expériences précédentes, mais les contraintes sur ces éléments sont sensiblement augmentées (pour la qualité du miroir principal, pour le système antivibratoire, etc.)

Deux éléments nouveaux s'ajoutent à l'installation

précédente et ont fait l'objet d'études détaillées: le système qui produira les transitions résonnantes, et les miroirs verticaux autour du miroir principal qui constitueront le piège horizontal des neutrons. Compte tenu du fait que nous rechercherons en premier lieu les transitions entre les états de nombres quantiques  $2 \rightarrow 6$  ou  $3 \rightarrow 7$ , les fréquences de transitions correspondantes seront de l'ordre d'un kilohertz. Deux possibilités pour le système d'excitation étaient initialement envisagées, l'utilisation d'un champ magnétique variable et la vibration du miroir horizontal principal. Nous avons montré que le système magnétique est le meilleur choix. Ainsi, nous avons développé un système simple composé de fils électriques parcourus par un courant permanent qui permettrait d'induire les transitions résonnantes dans un mode dit « flow-through » du fonctionnement du spectromètre. Plus tard, dans le mode de stockage nous produirons un gradient de champ magnétique uniforme et oscillant par un couple de bobines.

Nous avons étudié les différents bruits pouvant perturber les mesures. Pour cela, nous avons développé une méthode systématique pour le calcul de la probabilité de transition non résonnante entre les états quantiques induite par un bruit général. Ces développements théoriques ont été appliqués au bruit sismique et au bruit de surface du miroir principal. Nous avons montré qu'une protection antisismique passive est suffisante, sauf si le spectromètre devait être installé à l'étage supérieur du réacteur (niveau D), auquel cas une protection active deviendrait nécessaire. En ce qui concerne le bruit de surface du miroir, nous avons montré que les techniques de polissage choisies ne limiteront pas la précision des mesures. C'est surtout la grande surface de ce miroir (un carré de 30 cm de côté) qui représente un défi pour assurer sa planéité.



*Vue générale du spectromètre avec une source d'UCN dédiée à l'expérience.*

Les miroirs latéraux assurant le piègeage des neutrons ont nécessité une attention particulière. Ces miroirs devront subir un dépôt de diamant pour augmenter la vitesse horizontale critique de piègeage. Nous avons choisi le matériau à déposer dans une expérience dé-

diée à la mesure de la spécularité des réflexions sur différents dépôts [4]. Les ajustements mécaniques de ces miroirs latéraux ont aussi fait l'objet d'une étude spécifique: la verticalité de ces miroirs devra être meilleure que  $10^{-4}$  rad pour assurer un temps de stockage des états quantiques supérieur à une seconde.

Tous les éléments principaux du spectromètre sont déjà livrés ou en fabrication et nous avons commencé l'assemblage de l'installation.

## R&D des nouvelles sources d'UCN

La plupart des expériences avec les UCN sont limitées par la statistique, c'est pourquoi nous étudions différentes possibilités pour augmenter la densité d'UCN. Une méthode, qui sera utilisée dans la future installation GRANIT, consiste à extraire des UCN « sur place » en utilisant le même mécanisme que celui prévu pour la mesure du moment électrique dipolaire du neutron dans l'expérience CryoEDM: les UCN étant produits dans des collisions inélastiques de neutrons froids sur des phonons d'He superfluide. Jusqu'à très récemment, cette solution souffrait de l'impossibilité d'extraire les UCN sans diminution sensible de leur densité, et ne permettait alors que des expériences in-situ. Nos collaborateurs de l'ILL et de Munich ont pu contourner ce problème en proposant une méthode d'extraction d'UCN originale consistant en une fine fente horizontale formée d'un miroir parfait et d'un miroir très rugueux [5]. Ce système ne laisse sortir du volume de production que l'infime partie des UCN ayant leur vitesse presque parfaitement parallèle aux surfaces des miroirs, constituant les neutrons utiles pour GRANIT. Les UCN avec d'autres composantes de vitesses qui ne sont pas utiles pour GRANIT sont renvoyés par ce dispositif dans le volume de production, ce qui maintient la densité atteinte. Cette méthode a été testée avec succès et elle sera utilisée dans notre future expérience.

Nous étudions également d'autres possibilités pour augmenter la densité d'UCN, en particulier, en recherchant les mécanismes qui permettraient de pousser le processus de ralentissement des neutrons aux très basses températures. En effet, à très basse énergie, la longueur d'onde du neutron devient si grande qu'il n'interagit plus avec un unique noyau du milieu mais interagit de manière cohérente avec un grand nombre de noyaux, rendant les transferts d'énergie cinétique inefficaces.

Il y a quelques années, nos collaborateurs de l'ILL et de JINR (Dubna) ont découvert un mécanisme de transmission d'énergie d'UCN par interaction sur les nanoparticules qui se forment naturellement sur la surface de la quasi-totalité des matériaux. Ces particules ont une taille comparable à la longueur d'onde des UCN (de l'ordre de quelques microns) et, si elles sont suffisamment mobiles, peuvent interagir très efficacement avec les UCN.

Nous avons étudié théoriquement [6] le principe d'un modérateur formé de nanoparticules refroidies. Nous avons calculé les sections efficaces d'interaction (diffusion élastique, absorption) des UCN avec des nanoparticules et avons optimisé leur taille et leur composition chimique (avec le meilleur résultat pour le deutérium solide). Ces prévisions théoriques sont en cours de confrontation aux mesures des sections efficaces d'interaction (avec des gels ou des nano poudres), qui se déroulent à l'ILL et auxquelles nous participons. Nous avons également modélisé le processus de modération des UCN par nanoparticules en montrant que l'on doit pouvoir construire un modérateur d'une taille raisonnable de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

- 1 C.A. Baker et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 131801 (2006)
- 2 G. Ban et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 161603 (2007); arXiv:0705/2336v1
- 3 S. Baessler, V.V. Nesvizhevsky, K.V. Protasov, A.Yu. Voronin, "Constraint on the coupling of axionlike particles to matter via an ultracold neutron gravitational experiment", *Phys. Rev.* **D75**, 075006 (2007)
- 4 V.V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K.V. Protasov, G. Quémener et al., "Comparison of specularly reflecting mirrors for GRANIT", *NIM.* **A578**, 435 (2007)
- 5 P. Schmidt-Wellenburg, P. Geltenbort, V.V. Nesvizhevsky, C. Plonka, T. Soldner, F. Vezzu, and O. Zimmer. Development of a dedicated ultra-cold neutron source for the gravitational spectrometer GRANIT. ISINN-15, JINR, Dubna, Russia
- 6 V.V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K.V. Protasov, "Nanoparticles as a possible moderator for an ultracold neutron source", nucl-th/0510021, à paraître en *Int. J. of Nanosciences*, **6** (2007); CP850, "Low Temperature Physics: 24th International Conference on Low Temperature Physics". Edited by Y. Takano, S.P. Herschfield, S.O. Hill, P.J. Hirschfeld, A.M. Goldman. AIP, pp. 1679–1673

